

05.03.06
3-344

На правах рукописи



Зарезин Алексей Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЕНЕТРАЦИИ В
СОЧЕТАНИИ С ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ**

Специальность: 05.03.06 — «Технологии и машины
сварочного производства»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2003

Диссертация выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор, академик РАН
ШАХМАТОВ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ

Научный консультант: кандидат технических наук,
ИГНАТЬЕВ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
ЛУПИН ВЛАДИМИР АНТОНОВИЧ
кандидат технических наук
ПУЙКО АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

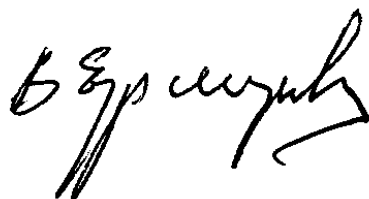
Ведущее предприятие — СЛ «Трубнонадзор» ООО «Уралтрансгаз».

Защита состоится «26» июня 2003 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «23» мая 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
доктор техн. наук, профессор



В. В. Ерофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Остаточные сварочные напряжения (ОСН) являются неотъемлемым результатом любого сварочного процесса. Они отрицательно сказываются на прочности, долговечности, устойчивости, размерной стабильности сварной конструкции и особенно опасны для конструкций с небольшим запасом пластичности, имеющих концентраторы напряжений. Задача регулирования — снижения, либо благоприятного перераспределения остаточных напряжений — не может быть грамотно решена без данных о распределении ОСН. Получение этой информации расчетным путем затруднено большим разнообразием узконаправленных методик и отсутствием общего решения. Кроме того, расчет не в состоянии учесть всех особенностей сварочного процесса и всех случайных факторов. Поэтому во многих случаях предпочтительнее использовать способы непосредственного измерения ОСН.

Существующие на данный момент методы измерения остаточных напряжений основаны на различных физических явлениях, используют разнообразные принципы и имеют большое число реализаций. Традиционно наиболее полную и достоверную информацию получают механическими методами, суть которых заключается в расчете остаточных напряжений по реакции исследуемого объекта на внесенное механическое возмущение.

Один из механических методов, метод пенетрации, в качестве возмущения использует вдавливание индентора в исследуемую поверхность, расчет ведется на основании закономерностей задачи внедрения упругой сферы в упругопластическое тело. Этот метод учитывает специфику измерения напряжений, возникающих в сварных конструкциях. Упругопластический подход позволяет определять напряжения близкие к пределу текучести без потери в точности. Используемый в методе голографический интерферометр позволяет измерять деформации бесконтактно, точно, информативно, без усреднения по базе. Вносимый концентратор напряжений незначителен и допускается нормативными документами, из чего следует, что в дальнейшем конструкция может быть использована по назначению без каких-либо ограничений. Однако широкое применение описанного метода для измерения ОСН затруднено по ряду причин. Необходимость предварительного тарировочного испытания на ненапряженном темплете, по механическим свойствам подобном исследуемому материалу, затрудняет использование метода в зонах шва и ЗТВ, поскольку механические характеристики в этих зонах могут значитель-

но отличаться от основного металла, а провести тарировку для всех зон не представляется возможным. Неавтоматизированная обработка полученных данных повышает вероятность ошибки и может привести к неоднозначным результатам. Химическая влажная обработка фотоматериалов голографического комплекса затрудняет приборную реализацию и автоматизацию процесса обработки информации.

Таким образом, разработка методики измерения ОСН с целью устранения выявленных недостатков метода является актуальной задачей, решение которой позволяет более широко использовать метод пенетрации для измерения напряжений возникающих при сварке.

Целью исследования является разработка методики определения остаточных напряжений, пригодной для контроля напряженного состояния сварных конструкций в нестационарных условиях с минимальным воздействием на исследуемый объект.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач:

1. Проанализировать и выявить основные закономерности деформирования упругопластического тела при его нагружении жестким индентором, установить влияние силовых факторов и механических свойств материала на перемещение точек поверхности в окрестности отпечатка.

2. Разработать способ и технологию цифровой регистрации и автоматизированной обработки полей перемещений поверхности тела с использованием персонального компьютера. Разработать рабочий макет и вариант измерительного комплекса для измерения ОСН.

3. Разработать методику определения ОСН, включающую в себя: определение начальных условий эксперимента расчетным путем, исключая операцию тарировки; методику записи, восстановления, обработки интерферограмм, автоматизированного определения нормальных перемещений поверхности; методику расчета ОСН по зарегистрированным деформациям.

4. Провести апробацию методики в реальных экспериментальных условиях и внедрить на предприятиях сварочной отрасли.

Методы исследования. Решение поставленных задач проводилось с помощью теоретических, лабораторных исследований, численных расчетов (МКЭ). Для исследований и анализа использовали исходную информацию полученную с помощью как стандартных приборов и методов измерений, так и разработанных специально. Данные обрабатывались с применением современного специализированного программного обеспечения (*Cosmos-M, ANSYS, MATLAB, MathCAD*).

Основные положения выносимые на защиту.

1. Выявленные закономерности влияния основных механических характеристик на диаграмму вдавливания ненапряженного материала, выраженную в виде зависимости максимальных нормальных перемещений поверхности от усилия вдавливания в методе измерения остаточных сварочных напряжений.

2. Математическое описание профиля нормальных перемещений в радиальном сечении напряженной поверхности в окрестности вдавливания индентора при измерении ОСН методом пенетрации.

3. Оптико-электронная система записи-восстановления интерферограмм, предназначенная для регистрации малых деформационных смещений поверхности, оптимизированная для метода пенетрации.

4. Разработанная методика определения остаточных сварочных напряжений методом пенетрации.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в установленных закономерностях влияния величины и знака остаточных сварочных напряжений, величины силового воздействия, формы индентора, свойств материала на величину и характер перемещений поверхности при упругопластическом контактом взаимодействии недеформируемого индентора с контртелом в отсутствии напряжений. Выявленные закономерности позволили количественно оценить влияние этих факторов в виде простых регрессионных зависимостей.

Разработанная схема оптико-электронного интерферометра оптимизирована для регистрации деформационных смещений в методе пенетрации при измерении остаточных сварочных напряжений. Проведенный анализ деформированного состояния поверхности в окрестности отпечатка индентора позволил функционально описать форму профиля нормальных перемещений и одномерный интерференционный сигнал в радиальном сечении интерферограммы, что позволяет автоматизировать процесс считывания данных.

Практическая ценность работы заключается в разработке неразрушающей методики измерения остаточных сварочных напряжений. Совершенствование метода достигнуто значительным сокращением ряда операций, исключением операции тарировки, химической обработки, автоматизации регистрации и обработки данных, тем самым сокращено время получения результата. Уменьшен вес и габариты измерительной системы за счет применения энергонезависимых малогабаритных электронных устройств регистрации.

Методика и вариант измерительного комплекса прошли апробацию: при натурных испытаниях на сварном трубопроводе и реко-

мендованы к применению на предприятиях нефтегазопромышленной отрасли; в рамках разработки технологии восстановления наплавкой плунжеров гидропрессов; при определении ОСН в сварных конструкциях из теплоустойчивых сталей и биметаллических сварных соединениях; внедрены на ряде предприятий: СЛ «Трубнонадзор» ООО «Уралтрансгаз» г. Челябинск, ООО «Композит» г. Нижний Тагил.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на международной выставке «Машиностроение. Прогрессивные технологии» (1997 г. Челябинск), межвузовской конференции «Актуальные проблемы преподавания в современных технических университетах» (1997 г. Уфа), международной конференции «Машиностроение-99» (1999 г. Челябинск), научно-технических конференциях сварщиков уральского региона «Сварка Урала — в XXI век» (1999 г. Екатеринбург), «Сварка-контроль. Итоги XX века» (2000 г. Челябинск), «Сварка Урала-2002» (2002 г. Курган).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, списка литературы и приложения, она изложена на 187 стр. машинописного текста, содержит 58 рисунков, и 29 стр. приложений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 3 в международных изданиях, 3 в центральной печати, 2 — в изданиях выпущенных под грифом Российской академии естественных наук.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Остаточные сварочные напряжения являются неотъемлемым результатом любого сварочного процесса. Они отрицательно сказываются на прочности, долговечности, размерной стабильности сварных конструкций. Исследование, учет влияния, регулирование ОСН — важная задача при проектировании как технологии сварки, так и самой сварной конструкции. Большой вклад в разработку теории сварочных деформаций и напряжений внесли ученые В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц, В. В. Ерофеев, Г. А. Николаев, Н. О. Окерблом, В. М. Сагалевич, Г. Н. Чернышев, М. В. Шахматов и др.

В связи со сложностями, возникающими при расчете ОСН во многих случаях непосредственное измерение напряжений является более предпочтительным. В развитии и совершенствовании экспериментальных методов определения остаточных напряжений основополагающими являются работы А. А. Антонова, И. А. Биргера, В. А. Винокурова, А. Г. Игнатьева, Л. М. Лобанова, О. Н. Михайлова, Г. А. Николаева, В. А. Пивторака и других.

В первой главе рассмотрены существующие на данный момент методы измерения остаточных сварочных напряжений. Кратко описаны принципы измерения напряжений механическими методами в виде решения трех взаимосвязанных подзадач:

1. Способ внесения механического возмущения в исследуемый объект: расчленение конструкции, снятие слоя, вырезание канавки, сверление отверстия, вдавливание индентора и другие. По виду возмущения методы подразделяются на разрушающие, малоразрушающие и неразрушающие. Количество информации, получаемой в эксперименте (интенсивность и направление главных напряжений распространенных в плоскости или объеме и т. п.), напрямую зависит от внесенного возмущения. Традиционно считается, что наиболее полную информацию о полях напряжений в объекте можно получить, используя методики полного разрушения.

2. Способ регистрации наведенных деформаций. Из всех способов особо выделены методы *лазерной интерферометрии* как наиболее точно отвечающие требованиям малоразрушающих методов. Перспективны способы, использующие электронные средства регистрации и обработки изображений. Кроме отказа от использования фотопластин и их химической обработки, методы позволяют работать с оцифрованными интерферограммами, что дает возможность обрабатывать изображение автоматически с применением вычислительной техники, повысить точность и производительность исследований.

3. Способ расчета напряжений по реакции объекта на внесенное возмущение. *Принцип упругой разгрузки* при высвобождении связей используется во многих методах (в частности в методе отверстия). Одним из существенных ограничений такого подхода является невысокий максимальный измеряемый уровень напряжений.

На наш взгляд, наиболее перспективен подход, основанный на решении задачи *упругопластического контактного взаимодействия*, где в качестве внесенного возмущения используется внедрение индентора, он позволяет производить измерения с минимальным воздействием на исследуемый объект.

Метод пенетрации основан на следующем принципе. При вдавливании сферического индентора в исследуемую поверхность вокруг остаточного отпечатка образуется наплыв (рис. 1), по параметрам которого, в частности, по значению максимального нормального перемещения W_{max} , делают заключение о направлениях, уровне и знаке ОСН.

В качестве способа измерения деформаций используется голографический интерферометр, регистрирующий нормальную компоненту вектора перемещения.

Определение ОСН выполняется в два этапа. *На первом этапе* методом тарировки на ненапряженном темплете определяется исходная диаграмма вдавливания материала в виде зависимости максимальных нормальных перемещений W_{0d} от диаметра отпечатка d :

$$W_{0d} = k_{Wd} \cdot d^2, \quad k_{Wd} = \frac{W_0}{d_0^2}, \quad (1)$$

где W_0 — максимальное нормальное перемещение при создании отпечатка, диаметром d_0 , k_{Wd} — коэффициент вдавливания.

На втором этапе фиксируются значения $W_{1,2}$ на осях симметрии интерферограммы, являющихся осями главных напряжений, и диаметр отпечатка d . Связь между величинами главных остаточных напряжений и максимальными нормальными перемещениями описывается выражением:

$$\sigma_{1,2}^{\text{ост}} = \frac{3}{2} \sigma_T \cdot \ln \left(1 - \frac{W_{2,1} - W_{0d}}{2W_{0d}} \right), \quad (2)$$

где σ_T — предел текучести материала.

Важными условиями при проведении измерений являются неизменность оптической системы и условий нагружения на обоих этапах, идентичность материала темплета, используемого для получения начальных условий, материалу объекта, а также отсутствие остаточных напряжений в темплете.

Метод наиболее полно соответствует современным требованиям к измерению ОСН — неразрушение конструкции, мобильность приборной реализации, скорость получения информации, нетребовательность к квалификации персонала. Метод позволяет регистрировать напряжения, в широком диапазоне их изменения, с удов-

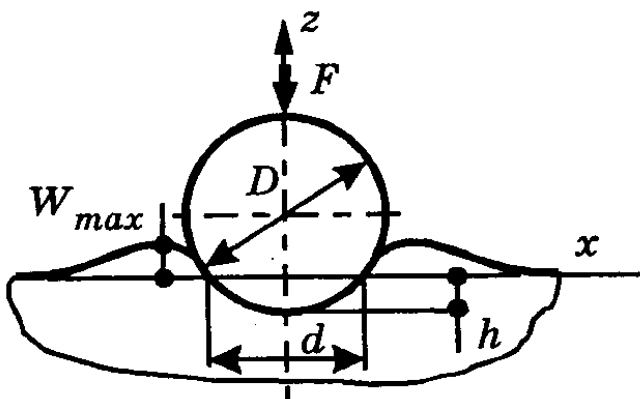


Рис. 1. Образование отпечатка индентора и наплыва при упругопластическом вдавливании индентора

летворительной точностью. Вносимый дефект незначителен (глубина 0,02–0,04 мм) такой дефект допускается практически всеми нормативами на ответственные сварные конструкции. Однако метод пенетрации в описанном выше виде имеет ряд недостатков:

1. Необходимость предварительного испытания — тарировки на ненапряженном темплете. В сварной конструкции диаграмма вдавливания W_{0d} неодинакова для различных зон соединения: шов, ЗТВ, основной металл. Определение ее для каждой из зон затруднительно.

2. Применение в качестве регистратора деформаций голографического интерферометра требует химической обработки и затрудняет автоматизированную обработку интерферограмм.

3. Визуальное считывание данных с восстановленной интерферограммы может привести к искажению данных, двойкой трактовке результата, повышает вероятность ошибки.

Цель и основные задачи исследования направлены на устранение выявленных недостатков.

Во второй главе произведено исследование напряженно-деформированного состояния тела при упругопластическом контактом взаимодействии при отсутствии остаточных сварочных напряжений. Анализ включает решение следующих задач: изучить кинетику изменения нормальных перемещений в процессе цикла нагружения; изучить влияние силы вдавливания F на диаметр отпечатка d и максимальные нормальные перемещения в окрестности отпечатка W ; изучить влияние свойств материала (предела текучести σ_T , показателя упрочнения G_T) на диаметр отпечатка и максимальные нормальные перемещения.

Анализ проведен методом конечных элементов. В процессе анализа варьировали три параметра F , σ_T , G_T . Регистрировали нормальные перемещения поверхности W . В результате многофакторного анализа получена регрессионная зависимость максимальных нормальных перемещений W_0 ненапряженного материала от значений F , σ_T , G_T :

$$W_0 = W_{0Б} \left(\frac{\sigma_{ТМ}}{\sigma_{ТБ}} \right)^{1/6} \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{E_M} - 1}{\sqrt{G_{ТМ}}} \right) / \left(\frac{\sqrt{E_B} - 1}{\sqrt{G_{ТБ}}} \right) \right] \cdot \frac{F}{F_{0Б}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{ТБ}$, $\sigma_{ТМ}$ — предел текучести базового и исследуемого материалов; E_B , E_M — модуль упругости базового и исследуемого материалов; $G_{ТБ}$, $G_{ТМ}$ — модуль упрочнения базового и исследуемого ма-

териалов; $F_{0Б}$ — усилие, вызывающее нормальные перемещения $W_{0Б}$ базового материала.

Зависимость позволяет определить начальную диаграмму вдавливания (1) выраженную через усилие вдавливания для любого материала относительно известного базового через отношение известных механических характеристик σ_T , G_T этих материалов, без проведения экспериментов на ненапряженном темплете.

Приведен пример расчетного определения начальной диаграммы вдавливания $W_0(F)$ для материалов с различными механическими свойствами относительно базового с $\sigma_T = 150$ МПа, $G_T = 10 \cdot 10^4$ МПа. Погрешность расчета по выражению (3) по отношению к вычислению МКЭ в среднем составила 7%.

С целью экспериментальной проверки полученной зависимости исследовались образцы, выполненные из следующих материалов: сплав на основе алюминия 01420, армко-железо, Сталь 20, 15Х2МФА, 12Х18Н10Т, 16ГС, титановый сплав ВТ-18У. Для каждого определяли основные механические характеристики σ_T , G_T и, методом тарировки, начальную диаграмму вдавливания $W_0(F)$. Принимая за базовый материал один из исследуемых, родственного класса, по выражению (3) определяли значение $W_{0,расч}(F)$, которые сравнивались с определенными экспериментально. Погрешность в среднем составила 10%. Таким образом, за базовый необходимо принимать материал родственного класса, определение механических характеристик базового и исследуемого материалов должно выполняться в подобных экспериментальных и расчетных условиях.

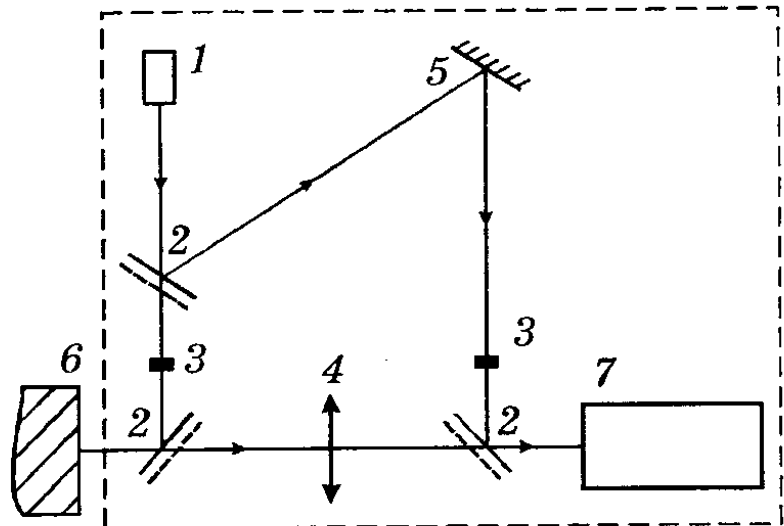
В третьей главе рассмотрены вопросы электронной регистрации нормальных деформационных смещений поверхности, вызванных вдавливанием индентора. Метод пенетрации предъявляет к методу регистрации деформационных смещений специфические требования: регистрация нормальной компоненты перемещений в независимом виде, высокая чувствительность. Таким требованиям вполне удовлетворяет метод электронной спекл-интерферометрии. Разработанная оптическая схема (рис. 2) и рабочий макет электронного спекл-интерферометра, учитывающего требования метода пенетрации, имеет следующие особенности: углы освещения и наблюдения равны нулю, что обеспечивает максимальную чувствительность к нормальным перемещениям, объектная волна диафрагмируется, а опорная исходит из мнимого источника в центре диафрагмы объектива, что увеличивает размер спеклов, обеспечивая их разрешение фотодетектором. В макете применен полупроводниковый лазер, что

значительно уменьшает габариты и исключает требование стационарного подвода электропитания.

Запись интерферограмм производится методом двух экспозиций, суть которого состоит в регистрации и сравнении спекл-изображений двух состояний поверхности — до и после ее деформирования. При этом спеклы, соответствующие смещенному состоянию, поверхности меняют свою яркость.

Рис. 2. Оптическая схема электронного спекл-интерферометра:

1 — лазер, 2 — полупрозрачное зеркало, 3 — микрообъектив, 4 — объектив, 5 — зеркало, 6 — объект, 7 — видеодетектор

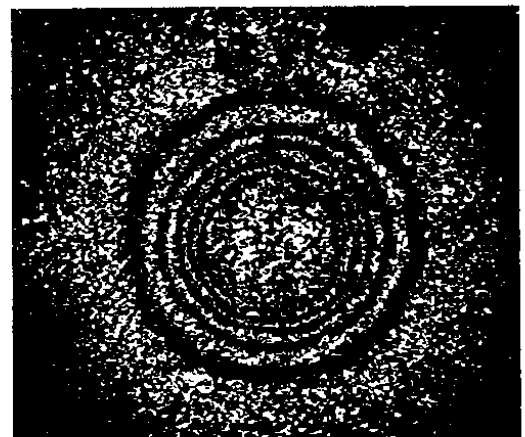


Показано, что *восстановление* электронной интерферограммы возможно произвести по распределению интенсивности исходных спекл структур методом поэлементного вычитания. Образующиеся светлые и темные полосы (рис. 3) являются полосами равных кратных перемещений. Нормальные перемещения вычисляются, исходя из номера полосы N и параметров оптической схемы, в нашем случае:

$$W = \frac{N\lambda}{2}, \quad (4)$$

где λ — длина волны источника когерентного излучения (690 нм).

Рис. 3. Пример интерферограммы, полученной методом электронной спекл-интерферометрии



Интерферограмма, полученная электронным способом обычно имеет низкий контраст и высокий уровень шума, однако к ней легко применить цифровые средства повышения качества: контрастирование, различного рода фильтрацию. Показано, что информация, полученная описанным способом электронной спекл-интерферометрии, интерпретируется аналогично голографической интерферометрии с учетом инверсии и имеет ту же чувствительность к малым деформационным смещениям, определяемую при «ручном счете полос» как половина полосы или $\lambda/4$.

Использование электронной обработки интерферограмм, отказ от «ручного» счета позволяет повысить производительность метода, снизить вероятность ошибки, учитывать дробные порядки полос при расчете деформационных смещений.

Для этого произведены исследования целью, которых было функционально описать профиль нормальных перемещений поверхности в радиальном сечении интерферограммы, полученной методом пенетрации напряженного объекта.

Исследовали интерферограммы полученные при разных вариантах одноосного нагружения образцов. На каждой из них определяли одномерный интерференционный сигнал I_r в 4-х характерных сечениях по осям симметрии. Для каждого сигнала методом ручного счета полос строили профили нормальных перемещений N_r , которые хорошо описываются следующей быстрозатухающей периодической функцией:

$$N(r) = b \cdot e^{-\frac{r}{m}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r}{\ln(c) \cdot m} - \varphi\right), \quad (5)$$

где b — коэффициент, определяющий пиковую высоту профиля; m — коэффициент, масштабирующий функцию по продольной оси; c — коэффициент, определяющий во сколько раз произойдет затухание периодической составляющей функции на протяжении ее первого полупериода; φ — начальная фаза периодической составляющей. В этом случае сам интерференционный сигнал определяется выражением:

$$I(r) = a \left[1 + \cos\left(2\pi \cdot b \cdot e^{-\frac{r}{m}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r}{\ln(c) \cdot m} - \varphi\right)\right) \right], \quad (6)$$

где a — амплитуда сигнала, определяемая параметрами оцифровки. Описывая регистрируемый сигнал выражением (6) и подбирая

коэффициенты a, b, m, φ, c можно однозначно определить иско-
мый профиль нормальных перемещений $N(r)$ в единицах номера
полосы (5), или, с учетом выражения (4), в абсолютных единицах
измерения. Определение максимальных нормальных перемещений
 W , производится на характерном радиусе, что не составляет ника-
кого труда при известном профиле.

В четвертой главе рассмотрены методические аспекты опре-
деления остаточных сварочных напряжений методом пенетрации в
сочетании с электронной спекл-интерферометрией, основанные на
проведенных исследованиях.

1. Методика определения начальной диаграммы вдавлива-
ния. Диаграммы W_{0d}, W_{0F} могут быть полностью определены ко-
эффициентами вдавливания k_{Wd}, k_{WF} :

$$W_{0d} = k_{Wd} \cdot d^2, \quad W_{0F} = k_{WF} \cdot F. \quad (7)$$

Тарировка осуществляется при наличии ненапряженного тем-
плета, либо зоны исследуемого объекта свободной от остаточных
напряжений. Проводится 3–5 испытаний темплета вдавливанием
индентора. Для каждого испытания регистрируются максимальное
нормальное перемещение и диаметр отпечатка, контролируется
усилие вдавливания. Вычисляется и усредняется коэффициент вдав-
ливания:

$$k_{Wd,n} = \frac{W_n}{d_n^2}, \quad k_{Wd} = \frac{\sum k_{Wd,n}}{n}. \quad (8)$$

Расчет. В случае, когда тарировка невозможна, начальная ди-
аграмма вдавливания определяется расчетом силового коэффици-
ента вдавливания k_{WF} . Расчет ведется по базовым значениям $\sigma_{ТБ},$
 $E_{Б}, G_{ТБ}, k_{WF,Б}$, определенным в подобных экспериментальных ус-
ловиях для материала одного класса с исследуемым. Искомый ко-
эффициент вдавливания $k_{WF,М}$ вычисляется по выражению

$$k_{WF,М} = k_{WF,Б} \cdot \left(\frac{\sigma_{Т,М}}{\sigma_{Т,Б}} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left(\sqrt{\frac{E_{М}}{G_{Т,М}}} - 1 \right) / \left(\sqrt{\frac{E_{Б}}{G_{Т,Б}}} - 1 \right). \quad (9)$$

2. Методика автоматизированного определения профиля нор-
мальных перемещений поверхности методом оценки локальной час-
тоты. Регистрируемый одномерный интерференционный сигнал в ис-
следуемом сечении интерферограммы представляет собой периодичес-
кую функцию с изменяющейся частотой. Аппроксимировать его
выражением (6) не представляется возможным. Для аппроксимации

предлагается использовать метод оценки локальной частоты сигнала, для чего, к зарегистрированному сигналу применяют процедуру преобразования Гильберта. Локальная частота зарегистрированного сигнала определяется численным дифференцированием полученной в результате преобразования развернутой локальной фазы сигнала.

Производная от фазы теоретического сигнала (6) является теоретической локальной частотой сигнала. Аппроксимируя зарегистрированный сигнал методом наименьших квадратов, определяют коэффициенты, входящие в выражение (6), которые однозначно определяют профиль сигнала $N(r)$ (5), или, в абсолютных единицах, $W(r)$ с учетом (4).

3. Окончательно методика определения остаточных напряжений выглядит следующим образом:

Подготовительный этап. Путем тарировки определяют коэффициенты вдавливания базовых материалов $k_{Wd,Б}$, $k_{WF,Б}$. Полученные данные, вместе с определенными основными механическими характеристиками ($\sigma_{ТБ}$, $E_{Б}$, $G_{ТБ}$) заносят в таблицы для дальнейшего использования.

На этапе регистрации: фиксируют первичные интерференционные картины до и после вдавливания индентора. Фиксируют усилие вдавливания F и диаметр восстановленного отпечатка d .

Расчет перемещений. Рассчитывают начальную силовую диаграмму вдавливания W_{0F} (7), которая определяется единственным коэффициентом $k_{WF,М}$ по характеристикам базового и исследуемого материалов (9).

Интерферограмму получают путем цифровой обработки первичных интерференционных картин с помощью специализированного программного обеспечения на ЭВМ. На осях симметрии интерферограммы фиксируют одномерные интерференционные сигналы в виде изменения интенсивности освещения I_r , которые обрабатывают по методике оценки локальной частоты с целью определения параметров профиля нормальных перемещений $N(r)$ в виде (5), по которому определяют максимальные нормальные перемещения $W_{1,2}$.

Вычисление напряжений. По определенным на предыдущих этапах значениям максимальных нормальных перемещений в отсутствии W_{0F} и при наличии напряжений $W_{1,2}$ определяют напряжения, действующие на соответствующих осях по выражению

$$\sigma_{1,2}^{\text{ост}} = \frac{3}{2} \sigma_T \cdot \ln \left(1 - \frac{W_{2,1} - W_{0F}}{2W_{0F}} \right). \quad (11)$$

Действующий макет и рабочий вариант прибора представляют собой гибридное оптико-электронное устройство. Оптическая часть — корреляционный спекл-интерферометр (см. рис. 2), в котором в качестве регистрирующего устройства используется электронная видеокамера (разрешение — 768×576 , минимальная освещенность — 0,01 люкс, питание — 12 В, вес — 300 г). Лазер — малогабаритный полупроводниковый, мощность излучения — около 2 мВт, длина волны — $0,69 \times 10^{-3}$ мм, питание — 3 В. Для захвата видеоизображений, оцифровки и передачи информации в персональный компьютер использованы устройства: видеограббер, разработчик ТОО «Системы Папилон» (г. Миасс); устройство *Snappy* фирмы *Play Inc.* Обработка поступающей информации осуществлялась с помощью математического программного обеспечения. Вдавливание шарового индентора осуществлялось с помощью специально сконструированного нагружающего устройства.

В пятой главе представлены апробация разработанной методики, а также ее использование в ряде задач исследования остаточного напряженного состояния сварных конструкций.

1. Методика и рабочий макет апробированы на тестовых образцах, для которых имеется достоверное теоретическое решение: изгиб балки, сжатие диска, растяжение пластины с отверстием. Погрешность измерения напряжений в данных задачах не превышает 10%.

2. Методика применялась при исследовании остаточных сварочных напряжений в соединениях из теплоустойчивых сталей в рамках хоздоговорных работ с ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург). Объект исследования представлял собой плоский образец, вырезанный из толстой пластины (рис. 4, а), сваренной с V-образной разделкой кромок. Основной металл соединения — сталь 15ХЗНМФА, металл шва — сплав 400/10. Для улучшения сплавления на кромку разделки перед сваркой наплавлена промежуточная облицовка из сплава 95/9. Пример распределения напряжений в зоне корневого шва приведен на рис. 4, б. Анализ распределения остаточных напряжений позволяет прийти к заключению о высокой нагруженности корневой и наружной зон сварного шва. При этом значительная часть соединения охвачена растягивающими напряжениями. На границах промежуточной наплавки как со стороны сварного шва, так и со стороны основного металла выявлены высокие градиенты изменения остаточных напряжений.

Также произведены исследования остаточных напряжений в биметаллических сварных соединениях из теплоустойчивых сталей. Результатом является заключение, что биметаллические со-

единения теплоустойчивых сталей характеризуются достаточно высокими предельными значениями главных остаточных напряжений и неблагоприятным их распределением в зоне линии сплавления.

Полученные данные явились основой для совершенствования конструктивных элементов сварного соединения.

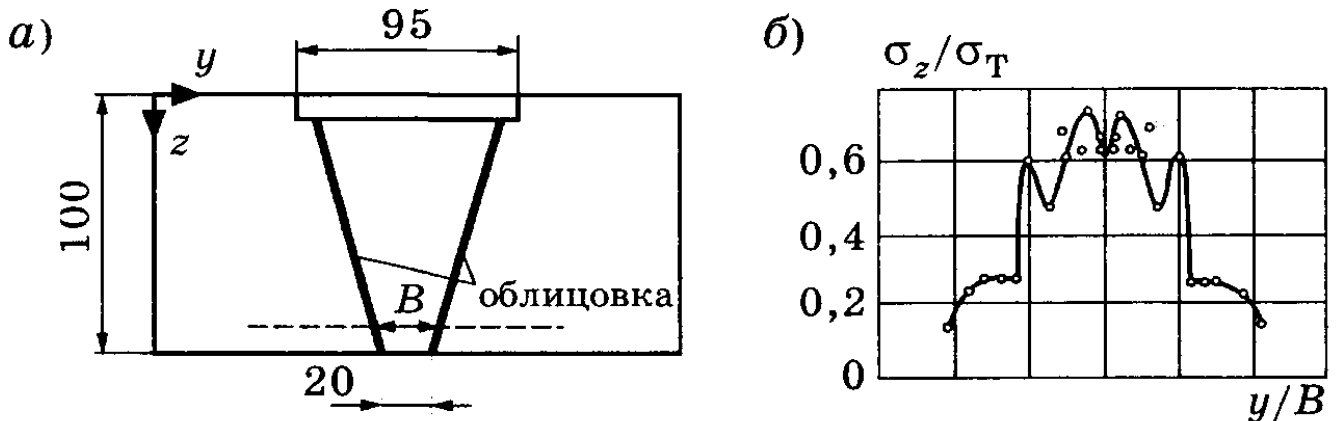


Рис. 4. Эскиз сварного соединения (а) и пример распределения остаточных напряжений в корневой зоне сварного соединения (б)

3. Методика применена при отработке технологии восстановления наплавкой плунжеров гидропрессов, на основе значений распределения ОСН после различного рода обработки поверхности. Работа выполнена в рамках совместных работ с АО «Политехник-НТ» (г. Нижний Тагил). Объект исследования — плунжер, выполненный из материала 38ХС. Наплавка производилась кольцевыми валиками, материал 08Х20Н9Г7Т. Одна часть наплавленного слоя подвергалась обточке, другая — обкатке роликом. В результате исследования ОСН, в зоне после обточки отмечены значительные ($0,7-0,8\sigma_T$) остаточные напряжения, в зоне, подвергшейся обкатке, появляются сжимающие напряжения, что благоприятно влияет на состояние поверхностного слоя. По результатам измерения ОСН рекомендована обкатка роликом на глубину 0,08 мм.

4. Проведены испытания метода и опытного оборудования на опытно-промышленной базе Института подготовки и транспорта энергоресурсов (г. Уфа) при определении напряженного состояния сварных трубопроводов, нагруженных внутренним давлением. Предлагаемый метод сравнивался с тензометрическим, проводился теоретический расчет напряженного состояния трубы. Отмечено, что метод дает хорошую корреляцию с расчетными данными и методом тензометрии (максимальная погрешность составляет 7%). Метод рекомендован к применению на предприятиях нефтегазопромышленного комплекса для контроля реальной нагруженности сварных магистральных трубопроводов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Остаточные сварочные напряжения отрицательно сказываются на прочности, долговечности, устойчивости, размерной стабильности сварной конструкции. Они особенно опасны в конструкциях, находящихся в хрупком состоянии, работающие при переменной нагрузке, изготовленных из материалов с небольшим запасом пластичности. В связи с большим разнообразием узконаправленных методик и отсутствием общего решения, непосредственное измерение ОСН во многих случаях предпочтительно.

2. Перспективным для задачи определения остаточных сварочных напряжений является подход к измерению ОСН, основанный на использовании упругопластического контактного взаимодействия недеформируемого индентора с поверхностью объекта.

3. На распределение перемещений при контактном взаимодействии влияет ряд факторов: величина силового воздействия, свойства материала, величина остаточных напряжений. Выявленные в результате численных и экспериментальных исследований закономерности позволили количественно оценить влияние этих факторов в виде простых регрессионных зависимостей в ненапряженном материале. Эти зависимости позволяют, основываясь на свойствах материала, получать начальные условия метода, представляемые в виде диаграммы вдавливания — зависимость максимальных нормальных перемещений от усилия вдавливания — расчетным путем.

4. Современным требованиям практики удовлетворяет разработанный рабочий макет установки, в котором в качестве источника излучения используется малогабаритный полупроводниковый лазер, в качестве детектора — высокоразрешающая видеокамера, изображение с которой оцифровывается и передается в компьютер. Показано, что восстановление интерферограммы возможно на основании данных об интенсивности исходных картин.

5. На основании исследования параметров профиля нормальных перемещений в радиальном сечении интерферограммы, получено математическое описание профиля и одномерного интерференционного сигнала, что позволяет автоматизировать процесс считывания и последующей обработки информации.

6. Разработанная методика определения начальных условий эксперимента расчетным путем позволяет использовать метод для определения ОСН в металле шва и ЗТВ сварной конструкции, где провести тарировку не представляется возможным.

7. Методика и технические средства позволяют измерять остаточные сварочные напряжения с чувствительностью порядка $0,1\sigma_T$, погрешность измерений по отношению к среднестатистическим значениям с 95% доверительной вероятностью не превышает 10%, исключается процедура химической обработки, тем самым повышается производительность, снижается количество ручного труда. За счет применения цифровой техники реализованы средства автоматизированного расчета остаточных сварочных напряжений по зарегистрированным деформациям.

8. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в практику исследования остаточных напряжений в сварных соединениях и конструкциях. Они использованы при анализе технологических процессов сварки с целью повышения работоспособности конструкции на предприятиях и в научных организациях.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Шахматов М. В., Зарезин А. А., Старцев А. Л. Техническая диагностика сварных трубопроводов на основе ультразвуковой толщинометрии // Сб. тез. докл. междунар. выставки «Машиностроение. Прогрессивные технологии». — Челябинск: Южуралэкспо, 1997. — С. 62.

2. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Неразрушающие измерения остаточных сварочных напряжений // Сб. тез. докл. междунар. выставки «Машиностроение. Прогрессивные технологии». — Челябинск: Южуралэкспо, 1997. — С. 64.

3. Шахматов М. В., Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Методика определения сварочных напряжений на основе голографической интерферометрии // Тез. докл. межвуз. науч.-метод. конф. «Актуальные проблемы преподавания в современных технических университетах». — Уфа: УГНТУ, 1997. — С. 91

4. Определение давления опрессовки сварных тонкостенных оболочковых конструкций / Ерофеев В. В., Шахматов М. В., Зарезин А. А. и др. // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематич. сб. научн. трудов. — Челябинск: ЮУрГУ, 1998. — С. 160–164.

5. Шахматов М. В., Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Применение персонального компьютера при измерении остаточных напряжений методом вдавливания индентора // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематич. сб. научн. трудов, Челябинск: ЮУрГУ, 1998. — С. 165–169.

6. Исследование остаточных сварочных напряжений методом голографической интерферометрии / Шахматов М. В., Еро-

феев В. В., Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. // Сварочное производство.— 1998.— № 5.— С. 3–5.

7. Шахматов М. В., Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Электронная спекл-интерферометрия при измерении остаточных сварочных напряжений // Сварочное производство.— 1998.— №12.— С. 24–27.

8. Shakhmatov M. V., Erofeev V. V., Ignat'ev A. G., Zarezin A. A. Examination of residual welding stresses by holographic interferometry // *Welding International*.— 1998.— V. 12.— №11. С. 890–893.

9. Игнатъев А. Г., Шахматов М. В., Зарезин А. А. Голографический прибор для измерения напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство.— 1999.— №1.— С. 3–6.

10. Игнатъев А. Г., Шахматов М.В., Зарезин А. А. Применение электронной спекл-интерферометрии при измерении остаточных сварочных напряжений // Тез. докл. 18 конф. сварщиков Урала «Сварка Урала — в XXI век», 2–5 марта 1999.— Екатеринбург: УГТУ, 1999.— С. 24.

11. Ignat'ev A. G., Shakhmatov M. V., Zarezin A. A Using electron speckle interferometry for measuring residual welding stresses // *Welding International*.— 1999.— V. 13.— №6. С. 488–490.

12. Ignat'ev A. G., Shakhmatov M. V., Zarezin A. A. A holographic system for measuring stresses in welded structures // *Welding International*.— 1999.— V. 13.— №7. С. 391–394.

13. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А Совершенствование метода измерения остаточных сварочных напряжений // Прогрессивные технологии в машиностроении. Сб. докл. 3 Междунар. конф. «Машиностроение-99». — Челябинск: ЮУрГУ, 1999.— С. 67–72.

14. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Метод измерения остаточных сварочных напряжений // Сб. докл. 19 н.-т. конф. сварщиков Урала «Сварка-контроль. Итоги XX века». — Челябинск: ЦНТИ, 2000, С.159–161.

15. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Остаточные напряжения в биметаллических сварных соединениях // Сб. докл. 19 н.-т. конф. сварщиков Урала «Сварка-контроль. Итоги XX века». — Челябинск: ЦНТИ, 2000.— С.161–164.

16. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Остаточные напряжения в сварных соединениях теплоустойчивых сталей // Сб. докл. 19 н.-т. конф. сварщиков Урала «Сварка-контроль. Итоги XX века». — Челябинск: ЦНТИ, 2000.— С.164–166.

17. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А., Тутубалин А. А. Контроль напряженного состояния стенки трубы магистрального неф-

тепловода в процессе эксплуатации // Тез. докл. 21 науч.-техн. конф. сварщиков уральского региона «Сварка Урала-2002». — Курган: КГУ, 2002. — С. 92–93.

18. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А., Тутубалин А. А. Применение электронной спекл-интерферометрии для контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // Интеллектика, логистика системология. Сб. науч. трудов, 2002. — № 9. — С. 41–45. Изд. ЧНЦ РАЕН, РУО МАИ, ЧРО МАНПО, ЧРО МААНОЙ. Челябинск.

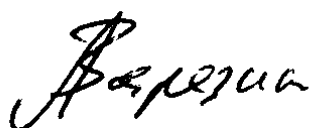
19. Зарезин А. А., Игнатъев А. Г., Тутубалин А. А. Обработка цифровых спекл-интерферограмм при измерении остаточных сварочных напряжений методом пенетрации // Интеллектика, логистика системология. Сб. науч. трудов, 2002. — № 9. — С. 58–63. Изд. ЧНЦ РАЕН, РУО МАИ, ЧРО МАНПО, ЧРО МААНОЙ. Челябинск.

20. Устройство для определения внутренних напряжений в объекте / Игнатъев А. Г., Зарезин А. А., Шахматов М. В. и др. // Информ. листок № 83-064-03. — Челябинск: ЦНТИ, 2003.

21. Способ определения остаточных сварочных напряжений в пластинах / Игнатъев А. Г., Зарезин А. А., Шахматов М. В. и др. // Информ. листок № 83-065-03. — Челябинск: ЦНТИ, 2003.

22. Способ определения остаточных напряжений в объекте и устройство для его осуществления / Игнатъев А. Г., Зарезин А. А., Шахматов М. В. и др. // Информ. листок № 83-066-03. — Челябинск: ЦНТИ, 2003.

Соискатель



А. А. Зарезин

Отпечатано в Челябинском ЦНТИ

Тираж 100 экз. Заказ №